干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.06.26

公平和效率视角的中国碳排放区域差异及其固化研究①

周　迪[1]，周丰年[2]，郑楚鹏[1]

(1　广东外语外贸大学经贸学院，广东　广州　510006；2　长江水利委员会长江口水文水资源勘测局，上海　200136)

摘　要：分别从公平和效率的角度考察中国省际碳排放的区域差异，可以比较区域碳减排配额分摊中公平原则和效率原则重要性大小。论文选取1997—2015年中国29个省级地区数据，首先通过包含非期望产出的Super-SBM模型测算出各地区的碳排放效率，并用人均碳排放量来衡量各地区的碳排放公平情况。随后基于Dagum基尼分解方法以及Markov链方法，分别从整体差异程度和内部差异固化两个方面比较了中国碳排放公平和效率的区域差异情况。研究发现：(1)中国碳排放公平和碳排放效率呈现出不一致的空间非均衡格局。(2)不管是整体、还是三大地区之间，中国碳排放效率的差异程度都大于碳排放公平，二者差异没有缩小的趋势。(3)各地区间碳排放效率的差异固化程度也要高于碳排放公平，中国碳排放的区域“长期低效率”固化问题比区域“长期不公平”固化问题更严重。因此，在计算中国区域碳减排潜力以及进行碳减排配额分摊时，效率原则比公平原则更加重要。中央政府也应更加重视区域碳排放效率的差异问题，更多的从碳排放效率上入手，挖掘其存在的更大碳减排潜力。

关 键 词：碳排放公平；碳排放效率；区域差异；Super-SBM模型；Dagum基尼系数；Markov链模型

为应对气候变化，实现可持续发展，中国提出到2030年单位GDP CO_2排放要比2005年下降60%～65%的目标，并力求在2020年建立全国统一碳市场，以市场的手段来控制碳排放。因此客观的评估各省份的碳减排潜力、合理的分摊碳减排份额极其重要。国际上关于碳减排份额分摊主要有效率原则和公平原则两大观点[1]，对中国省际而言也不例外，基于总量控制的省际配额分配是中国碳减排的现实途径[2]。那么，对中国而言，这两大原则应认为同等重要还是有所侧重？这一问题的回答对于计算中国各省份碳减排潜力以及碳减排分摊具有重要的意义。为此，本文尝试对这一问题进行研究，分别从区域整体差异以及差异内部固化两个方面对中国省际碳排放公平和碳排放效率进行比较。差异表现出的是区域间不均衡的现象，固化则表现出随时间改变差异的“追赶”和调节情况。若碳排放公平都很大，表明目前中国碳排放公平不仅存在区域差异大、分布不平衡的现象，而这种局面难以自发改变，需要外力的介入，当前政府调节力度还不够，相对效率存在较大的改进空间，因此也存在着更大的碳减排分摊空间。在测度各省份碳减排潜力以及合理分配碳权时，我国应该更加注重公平原则，以促进区域协调发展，反之亦然。这对政府制定科学的区域碳减排政策具有重要的意义。

当前，学术界以碳排放公平或效率为主题已进行了大量的研究。在单一公平原则的视角下，学者们主要从主权、平均主义、横向公平、垂直公平等视角展开研究[3-5]。通过构建不同的指标方法(Indicator Approach)进行碳排放公平性的衡量以及碳减排分摊的设计，既包括基于人口[6]、历史排放[7]、GDP[8]、排放强度[9]等的单指标方法，也包括综合指标法[10]；而在单一效率原则的视角下，现有文献主

---

①　**收稿日期**：2019-04-21；　**修订日期**：2019-08-12
基金项目：广东省自然科学基金博士启动项目(2018A030310044)；广东省高校优秀青年创新人才培养计划资助项目(2012LYM_0060)；广东省哲学社会科学“十二五”规划项目(GD15YYJ03)
作者简介：周迪，男，博士，讲师，主要研究方向为区域经济、区域资源配置. E-Mail：zhoudi19880101@163.com
通讯作者：周丰年. E-mail：cjkfnzhou@126.com

要基于 DEA 框架下的全要素效率视角来计算碳排放效率。在计算过程中,有学者将碳排放作为投入要素进行处理[11],但把“好”产出与“坏”产出进行非平衡处理的方式扭曲了效率的评价,会造成政策实践的偏离[12]。因此大量学者尝试将碳排放视作非期望产出[13-14],但传统的 DEA 模型大都属于径向(radial)和角度(angle)的度量,没有充分考虑投入产出的松弛问题,使得度量的效率值不够准确。而考虑非期望产出的 SBM 模型把松弛变量直接放入目标函数中,不仅解决了投入产出松弛的问题,也解决了非期望产出存在下的效率评价问题,因此,得到了越来越多学者的使用[15-19]。LIU 等[15]测算出中国各省份的碳排放效率后,根据碳排放效率的高低以及能源利用合理与否,采用 K 均值聚类方法将中国各省份分为 5 种类型;李小胜和宋马林[18]对中国区域碳排放绩效差异进行了研究,发现不同区域的碳排放绩效、减碳潜力和规模差异较大。除此之外,一些学者[19]基于 SBM 模型框架进行区域碳减排潜力测度。还有大量学者[18,20-22]基于效率原则对中国碳排放配额分摊展开了研究。

随着研究的深入,单一原则视角的缺陷日益突出,学者开始结合了两类原则进行研究,WEI[23]基于两大原则构建了碳减排潜力指数(ACI),将公平与效率纳入了同一个测量体系。该指数提出后,得到了国内较多学者的借鉴,如吴贤荣等[24]利用该指数测算了中国各省农业碳减排潜力指数;冯冬和李健[25]采用相同的方法对各京津冀各城市的减排潜力进行了定量分析和类型划分。但该指数采用的是等权重,忽视了公平原则和效率原则的重要性差异。

目前碳排放公平和效率的文献较为丰富,这对于本文的开展奠定了重要的基础,但仍存在一定的改进空间:(1)已有研究虽然尝试研究碳排放公平和效率问题,但忽视二者在考察碳减排潜力及碳减排配额上的重要性差异,这将导致结果有偏进而影响碳减排分摊政策。(2)缺乏从固化的角度来考察碳排放公平和效率的差异问题,事实上区域总差异程度不变的情况下也可能存在内部各地区水平的“追赶”或“流动”,流动性越大,更有可能缩小地域间的差异,因此这种内部动态视角的差异固化分析是整体差异程度分析的一种重要补充。因此,本文从碳排放区域差异入手,分别测算中国碳排放公平和效率的区域差异程度及其差异的固化程度,并基于二者的比较,对中国的碳排放情况进行全面剖析,进而给出区域碳减排分摊政策制定的建议。

1 研究设计

1.1 研究方法

1.1.1 碳排放公平的计算——考虑省份人口差异的方法 碳排放权作为自然人的基本权利必须得到保障,因此要充分考虑人均公平的约束或原则。考虑到中国的基本国情以及对共同富裕的追求,本文在参考王科等[21]的研究基础上,采用人均碳排放量作为衡量省域碳排放公平的指标。

1.1.2 碳排放效率的计算——包含非期望产出的 Super-SBM 模型 本文研究对象之一为我国各省域的碳排放效率,为了使碳排放效率测量结果更科学准确,本文采用包含非期望产出的 Super-SBM 模型。考虑到包含非期望产出的 Super-SBM 模型较为成熟,论文不具体介绍其数学公式,可参考相关文献[26]。

1.1.3 静态视角下整体差异程度比较——Dagum 基尼系数分解 Dagum 基尼系数的计算公式如下:

$$G = \sum_{j=1}^{k}\sum_{h=1}^{k}\sum_{i=1}^{n_j}\sum_{r=1}^{n_h}\left|y_{ji} - y_{hr}\right| \Big/ 2n^2\,\bar{y} \qquad (1)$$

式中:y_{ji}(y_{hr})是 j(h)类地区中的任意一省份 i(r)的碳排放公平(效率);$\bar{y}$ 为总体均值;n 是省份个数;k 是区域划分的类型数;n_j(n_h)是 j(h)类区域的省份数量。本文将地区划分为 3 类,分别包含的省份个数为 10、9、10。

Dagum 基尼系数可分解成 3 个部分:地区内差异(G_w),地区间净值差(G_{nb}),超变密度(G_t),满足 $G = G_w + G_{nb} + G_t$。为节约篇幅,不具体介绍分解过程,可参考相关文献[27-28]。

1.1.4 动态视角下内部差异固化比较——Markov 链模型 本文构造了多年时长的 Markov 转移概率矩阵,以考察随着时间积累区域碳排放公平(效率)的转移变化情况,挖掘出更多的区域差异固化信息。具体方法如下:

假设各地区根据碳排放公平(效率)的不同划分为 k 个类型,一步时长为 d 年的转移概率记为 $P_{ij}^{t,t+d} = P\left\{X_{t+d} = j \middle| X_t = i\right\}$,表示第 t 年水平处于 d 类型的地区在 j 年后转移到 类型的概率,综合整个考察期间内所有地区和所有可能转移的情况,得到考察期 T 内的 Markov 转移概率 P_{ij}^{d},分别对不同类

型的转移概率进行估计,进而得到如(2)式所示的 d 年时长 Markov 转移概率矩阵:

$$\begin{matrix} \frac{n_{11}^d}{n_{1\cdot}^d}\cdots\frac{n_{1j}^d}{n_{1\cdot}^d}\cdots\frac{n_{1k}^d}{n_{1\cdot}^d} \\ \frac{n_{21}^d}{n_{2\cdot}^d}\cdots\frac{n_{2j}^d}{n_{2\cdot}^d}\cdots\frac{n_{2k}^d}{n_{2\cdot}^d} \\ \cdots\quad\cdots\quad\cdots\quad\cdots \\ \frac{n_{k1}^d}{n_{k\cdot}^d}\cdots\frac{n_{kj}^d}{n_{k\cdot}^d}\cdots\frac{n_{kk}^d}{n_{k\cdot}^d} \end{matrix} = \begin{matrix} p_{11}^d\cdots p_{1j}^d\cdots p_{1k}^d \\ p_{21}^d\cdots p_{2j}^d\cdots p_{2k}^d \\ \cdots\quad\cdots\quad\cdots \\ p_{k1}^d\cdots p_{kj}^d\cdots p_{kk}^d \end{matrix} \tag{2}$$

式中:P_{ii}^d表示 i 类型地区在 d 年后仍为 i 类型的转移概率,值越大表示碳排放公平(效率)的区域差异固化程度越高。为了对不同指标的固化程度进行比较,需要对它们的转移概率矩阵进行统计检验,为此,本文借鉴 GALLO[29] 构造似然比卡方统计量来完成。

1.2　数据来源与处理

基于数据的可获得性和实证分析的需要,本文选取了 1997—2015 年中国大陆 29 个省(市、区)作为研究对象,西藏及海南因数据缺失不包含在内,采用资本、劳动力、能源等投入数据,GDP、碳排放量等期望及非期望产出数据来计算碳排放效率。数据处理包括:

以资本存量来衡量资本投入,由于无法直接得到各省份资本存量数据,以单豪杰[30] 为基础,得到 1952 年为基期的资本存量,缺失的数据采用永续盘存法补齐,在计算过程中各省份固定资本形成总额数据采用固定资产投资价格指数调整为 1952 年为基期的可比价;以各省份的三次产业就业人员之和来计算劳动力投入量;以各省份能源消费总量计算能源投入;为了和以 1952 年价格计算的资本存量数据相统一,将各省名义 GDP 调整为以 1952 年为基期的实际 GDP;在 CO_2 排放量的计算上,结合中国现状,主要考虑了化石燃料燃烧以及水泥消费两个方面。由于目前国内尚无官方或权威的各省份碳排放数据,本文采用杜立民[31] 的测算方法,根据化石燃料燃烧和水泥的消耗量及其对应的碳排放系数折算出各省份的碳排放总量,计算公式为:

$$C = \sum C_i = \sum e_i \times \varepsilon_i \tag{3}$$

式中:e_i 各类资源消耗量;ε_i 为对应的碳排放因子。其中,煤炭、焦炭、汽油、煤油、柴油、燃料油、水泥的 CO_2 排放系数分别为:1.647、2.848、3.045、3.174、3.15、3.064、0.527 t $CO_2\cdot t^{-1}$,天然气的 CO_2 排放系数为 21.670 t $CO_2\cdot(10^9\ m^3)^{-1}$。另外,人均碳排放量采用各省份碳排放总量与年末总人口相除得到。

在数据来源上,劳动力数据来源于各省份的统计年鉴;人口数据来源于《中国统计年鉴》;能源数据来源于《中国能源统计年鉴》;GDP 及 GDP 指数数据、资本投入相关数据以及水泥数据来源于国泰安数据库。

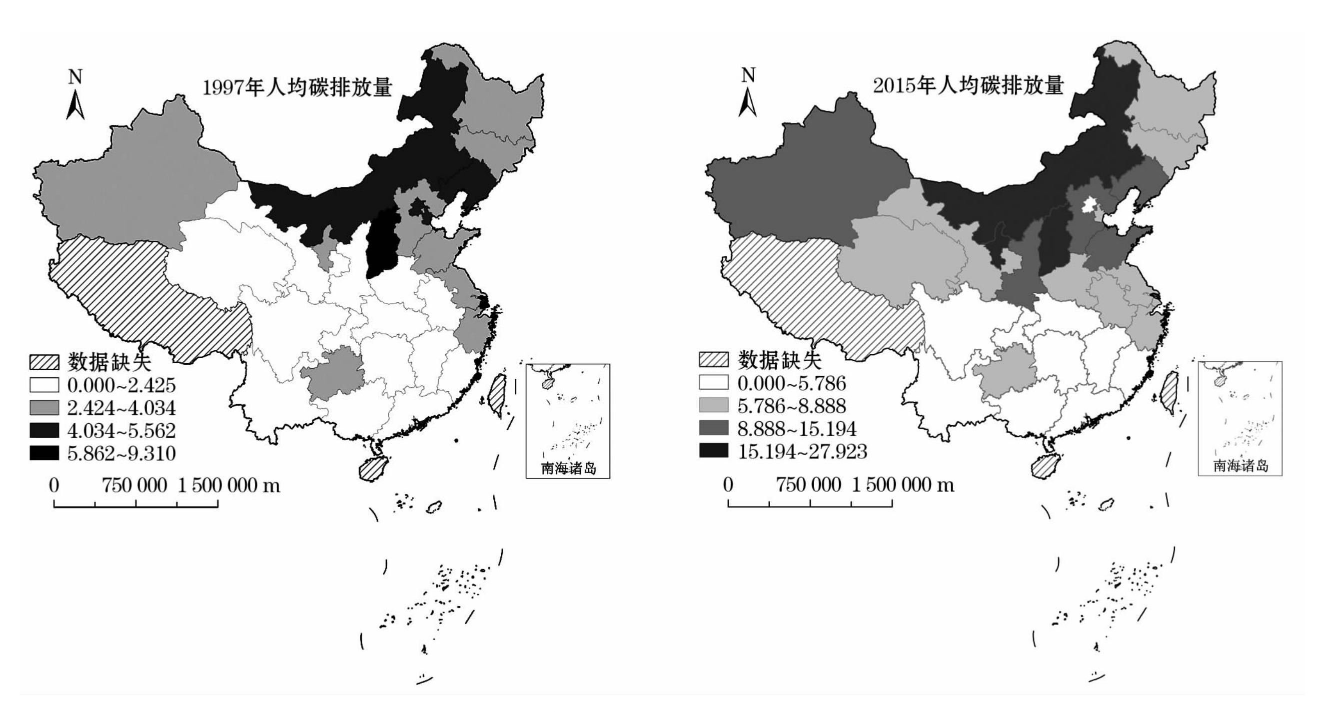
2　中国区域碳排放公平和效率的整体差异程度比较

2.1　中国碳排放公平和效率的空间格局差异

在完成中国碳排放公平与效率的计算与测度后,本文采用 ArcGIS10.0 软件,分别对考察期期初和期末的碳排放公平与碳排放效率进行可视化呈现,以直观地考察中国碳排放公平和效率的空间格局及差异。采用自然间断点方法(Natural Breaks Method)将各地区分低、中低、中高和高水平四大类型。具体如图 1 和图 2 所示。

从图 1 可以看到,1997 年中国碳排放公平存在较为明显的空间非均衡特征,其中广大的中西部地区都处于低水平,即介于 0.001 ~ 2.425 × 10^3 kg · 人$^{-1}$之间的较低公平度状态;碳排放量处于中低水平类型的地区也较多,包括新疆、贵州、宁夏、和浙江等省份,这些地区的人均碳排放量介于 2.425 ~ 4.034 × 10^3 kg · 人$^{-1}$之间,处于中低公平度。2015 年,各类型地区碳排放公平都有所增加,且各类型地区碳排放公平的差异也更加明显,碳排放公平的空间非均衡格局进一步加剧。具体的,低水平类型地区中,除北京是从 1997 年的中高水平降为低公平外,其他地区在 1997 年也属于低水平,主要位于中南地区、西南地区,介于 0.000 ~ 5.78 × 10^3 kg · 人$^{-1}$之间;在 2015 年中低水平类型地区的分布较为分散;中高和高水平类型地区主要位于北方,中高水平地区包括辽宁,陕西、河北和山东;高水平类型地区仍有两个省份,分别是山西和内蒙古。

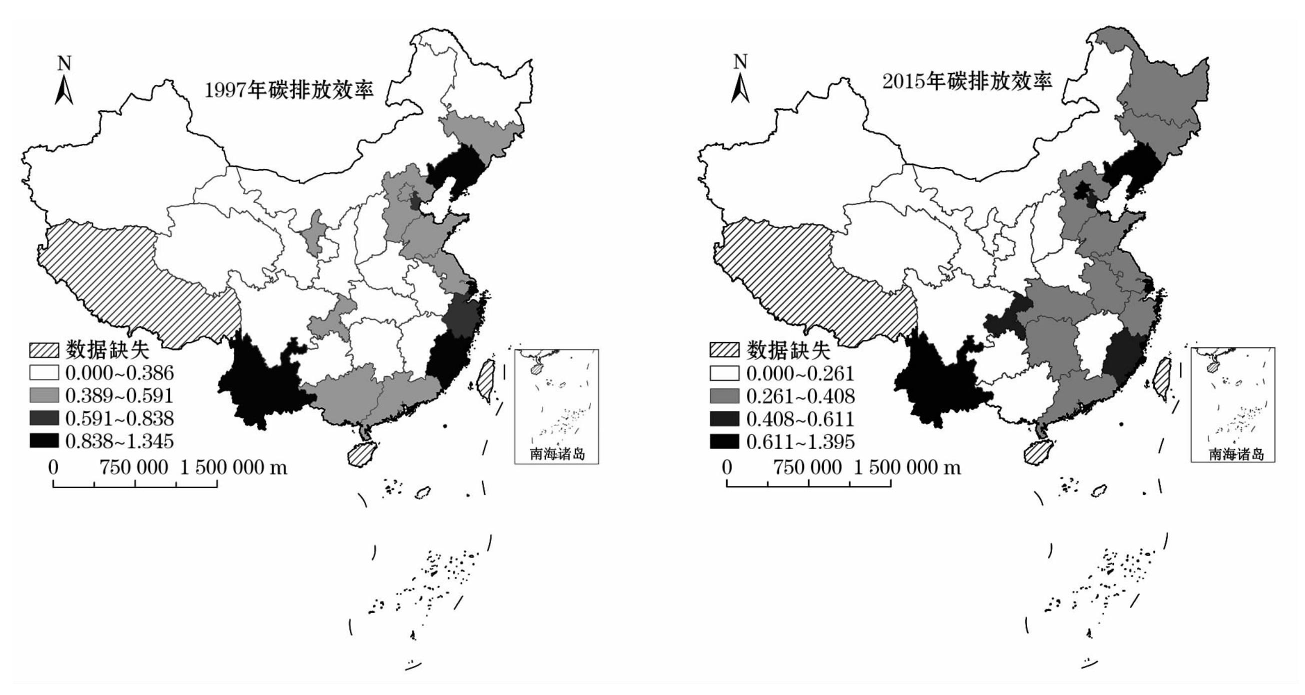
从图 2 可以看到,中国各地区碳排放效率也存在明显的空间非均衡特征,1997 年绝大多数地区的碳排放效率都介于 0 ~ 0.386 之间,处于效率低水平类型。这些地区主要为中西部地区;处于中低水平类型的地区数量也较多,包括吉林、河北、北京、



审图号:GS(2008)1044 号

图 1 代表性年份中国碳排放公平的空间格局(单位:10^3 kg·人$^{-1}$)

Fig. 1 Spatial pattern of China's carbon emission equity in representative years (Unit:10^3 kg per capita)



审图号:GS(2008)1044 号

图 2 代表性年份中国碳排放效率的空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of China's carbon emission efficiency in representative years

宁夏和重庆等省份,其效率介于 0.386 ~ 0.591 之间,处于中低水平类型;中高水平类型地区较少,只有天津和浙江两地;碳排放效率处于高水平的地区包括辽宁、福建、上海和云南四地。2015 年,各类别的上下限整体有小幅的下降,但区域分异格局更加明显:东部效率处于稳定的较高水平,中部有所上升,西部进一步下降。

2.2 碳排放公平和效率的区域差异程度比较

为了进一步考察中国各地区碳排放公平和效率的差异程度以及演进趋势,本文采用 Dagum 基尼系

数及其分解方法对碳排放公平和效率的差异进行测算。分别得到二者的整体差异、三大地区之间的差异以及整体差异的来源分解,分别如图3~5所示。

从图3可以看到:在考察期内,整体的省际碳排放效率基尼系数呈现出上升的趋势,从1997年的0.308上升到2015年的0.380,年均增长1.03%。可见各地区间的碳排放效率差异呈现出逐渐增大的趋势,如果不加以调节,有达到0.4的"警戒线"水平的可能。我国碳排放效率的区域差异程度始终大于碳排放公平,可见,中国区域碳排放效率的非均衡程度大于公平,区域碳减排的效率潜力相对公平潜力更大。

图4给出了三大地区之间的碳排放公平和碳排放效率差异演进图,表明区域间碳排放效率的差异较大。特别是近年来东—中地区以及东—西地区之间的基尼系数都超过了0.4的"警戒水平",显现中国三大地区间的碳排放效率差异比整体的差异更明显。在区域间碳排放公平的差异上,三大地区之间的差异都较为接近,且整体都相对较小,上升趋势不明显。可见,三大地区之间和全国整体的情形一致,都是碳排放效率的差异更大。

在差异的来源上,地区间差异对碳排放效率的总差异贡献明显,贡献程度在考察期内虽不断下降,在1997年达到63.905%,在2015年仍有56.651%(图5)。其次为地区内的贡献,其平均贡献程度为26.599%,不到前者的一半。超变密度的贡献程度在考察期内呈现不断上升的趋势,平均贡献为14.727%。在碳排放公平上,地区内差异占比较为稳定,平均值为30.765%。而地区间差异的占比呈现出先降后升的U形特征,平均贡献率为23.975%。超变密度的贡献程度则呈现出刚好相反倒U形特征,平均贡献率为45.260%,超变密度的变化越大,表明区域划分方式不够合理,呈现出"交叉重叠",反映了区域梯度不明朗,这和三大地区之

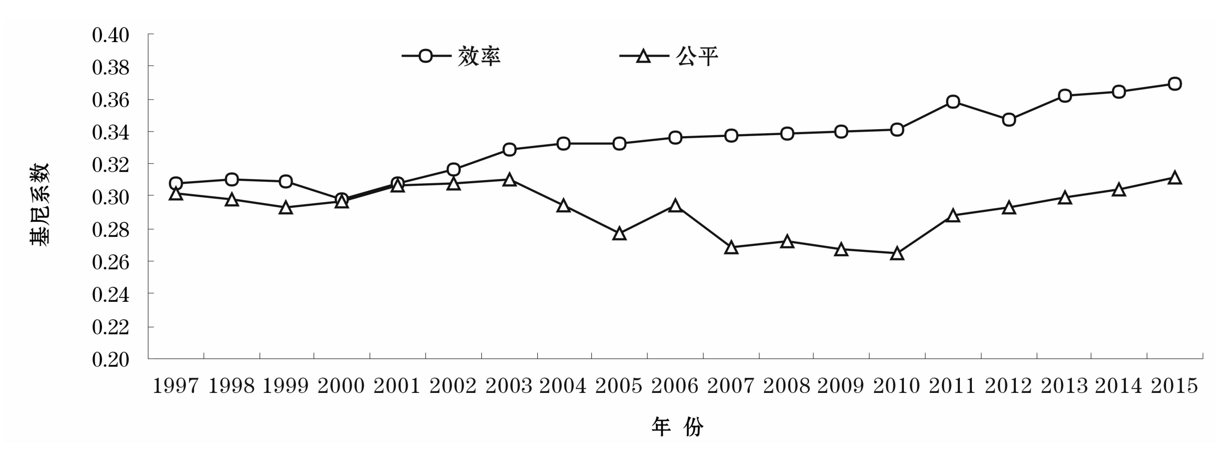


图3　碳排放公平和效率的整体差异演进

Fig. 3　Evolution of the whole difference of carbon emission fairness and efficiency

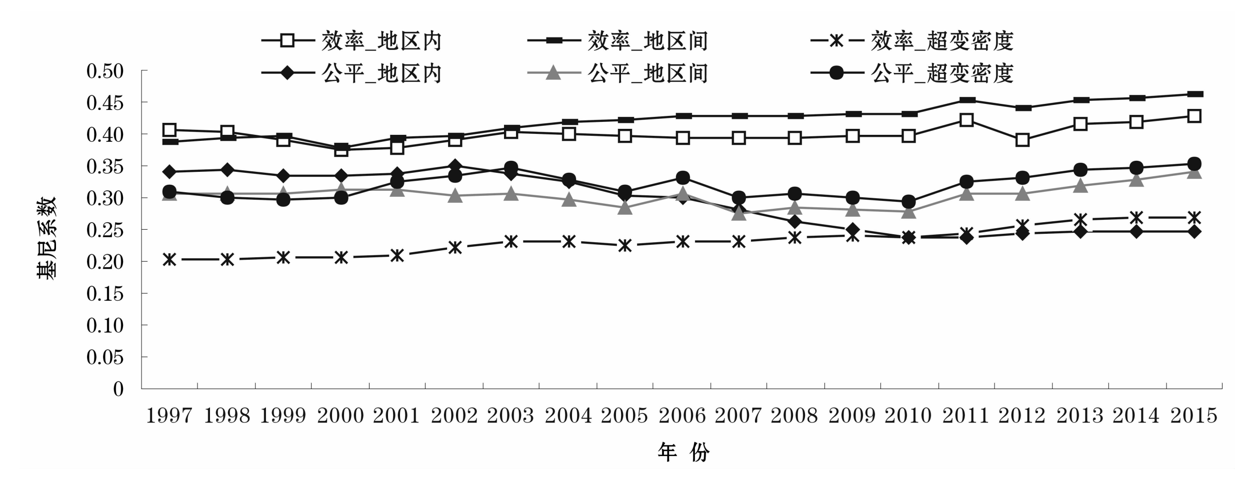


图4　地区间碳排放公平和效率的差异演进

Fig. 4　Difference evolution of carbon emission fairness and efficiency between regions

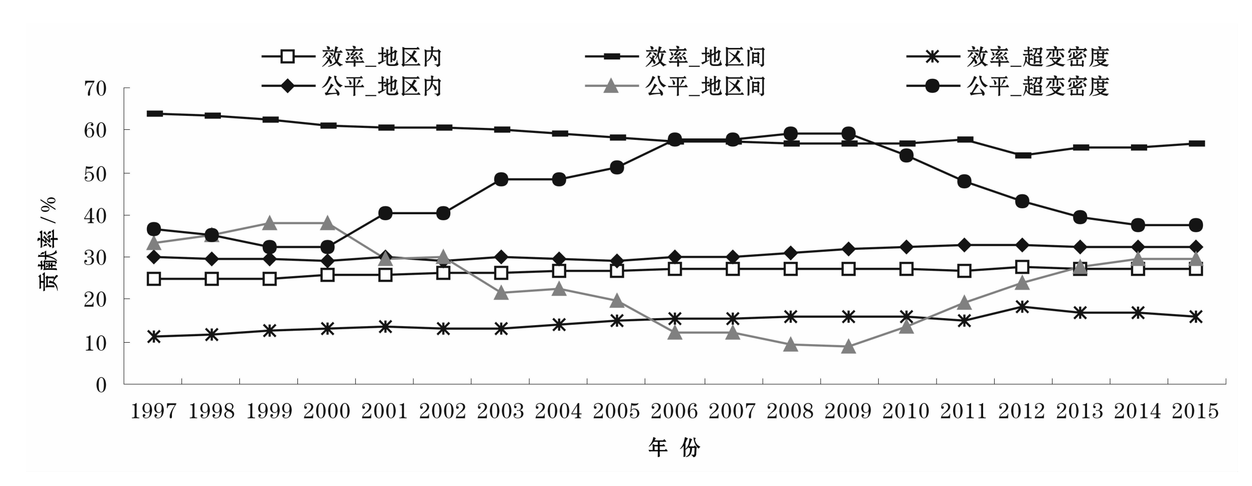


图 5　碳排放公平和效率的差异分解

Fig. 5　Difference decomposition of carbon emission fairness and efficiency

间碳排放公平差异相对较小的结论相一致。

3　中国区域碳排放公平和效率的内部差异固化比较

由于基尼系数仅仅从静态及整体上分析碳排放公平(效率)的区域差异程度,无法挖掘出内部各地区碳排放公平(效率)随着时间变化"追赶"或"流动"的信息,也无法看出低水平地区一直处于低水平、高水平地区一直处于高水平的这种固化信息。为此,本文采用 Markov 链模型考察不同地区碳排放公平(效率)随着时间变化的流动情况,计算了 1 ~ 3 a时长的 Markov 转移概率结果,具体见表 1。

从表 1 可以看到:(1)碳排放效率固化程度整体上大于碳排放公平。从主对角线元素可以看到,除了中低水平类型(ML)外,其他类型地区在公平上的流动程度明显大于效率。例如当年人均碳排放处于低水平的地区,一年后向上流动的概率达到 12%;而当年处于碳排放低效率的地区一年后向上流动的概率只有 4.9%,当年人均碳排放处于高水平的地区向下流动的概率为 7.1%;而碳排放效率高水平的地区向下流动概率只有 2.1%。

(2)随着时间的积累,不管是碳排放公平还是效率,其内部的固化程度都有所减弱,可见,不同地区之间的"追赶"效应需要时间积累。但碳排放公平和效率的这种固化程度差异依然存在,且差异程度随着时间积累不断增大。这是由于随着时间积累,区域碳排放效率的流动性提高有限,而公平的流动性提高明显。例如,当年碳排放效率为低水平的地区在3 a后向上流动的概率也只有7.1%,远低于

表 1　碳排放公平和效率的内部流动矩阵

Tab. 1　Internal flow matrix of carbon emission fairness and efficiency

时长/a	类型	碳排放公平					碳排放效率				
		n	L	ML	MH	H	*n*	L	ML	MH	H
1	L	117	0.880	0.120	0.000	0.000	144	0.951	0.049	0.000	0.000
	ML	135	0.089	0.844	0.067	0.000	108	0.111	0.778	0.111	0.000
	MH	101	0.000	0.089	0.812	0.099	125	0.000	0.096	0.872	0.032
	H	169	0.000	0.000	0.071	0.929	145	0.000	0.000	0.021	0.979
2	L	111	0.838	0.153	0.009	0.000	136	0.949	0.052	0.000	0.000
	ML	127	0.118	0.772	0.102	0.008	102	0.157	0.686	0.157	0.000
	MH	97	0.000	0.155	0.691	0.155	119	0.000	0.135	0.798	0.067
	H	158	0.000	0.000	0.114	0.886	136	0.000	0.000	0.044	0.956
3	L	104	0.779	0.202	0.019	0.000	126	0.929	0.071	0.000	0.000
	ML	120	0.150	0.717	0.117	0.017	98	0.235	0.571	0.194	0.000
	MH	92	0.011	0.174	0.641	0.174	113	0.000	0.168	0.735	0.097
	H	148	0.000	0.007	0.135	0.858	127	0.000	0.000	0.063	0.937

注:分别以 L、ML、MH、H 代表低水平、中低水平、中高水平和高水平 4 个组别,*n* 代表样本数

碳排放公平的 22.1%;另外,当年碳排放效率为高水平的地区 3 a 后向下流动的概只有 6.3%,也不到碳排放公平(14.2%)的 1/2。从长期来看,中国碳排放公平和碳排放效率的区域差异固化程度都较高,但碳排放效率的区域固化程度更,且随着时间积累,二者的固化程度差异更明显。

这种差异是否具有统计学意义呢?即是否具有显著性差异呢?下面进行卡方检验[29],由于检验过程中不同指标的先后排放会对检验结果产生影响,论文给出两种排放方式下的结果,具体如表 2 所示。可以看到在时长为 1~3 a 下,卡方检验都通过了显著性检验,且 Q 值随着时长不断增大,这表明中国碳排放公平和碳排放效率的区域差异固化程度确实存在着显著性的差异,后者显著大于前者。

表 2　碳排放公平与效率固化程度差异的显著性检验

Tab. 2　Significant test of differential solidification between fairness and efficiency of carbon emission

时长 / a	类型	Q	df	c^2	P
1	公平—效率	39.567	12	21.026	8.5×10^{-5}
	效率—公平	37.632	11	19.675	9.0×10^{-5}
2	公平—效率	62.091	12	21.026	9.4×10^{-5}
	效率—公平	59.206	12	21.026	3.1×10^{-5}
3	公平—效率	81.231	12	21.026	2.4×10^{-5}
	效率—公平	74.204	12	21.026	5.2×10^{-5}

4　结论与启示

文章基于 1997—2015 年中国 29 个省区的数据,首先采用包含非期望产出的 Super-SBM 方法测算了各省份的碳排放效率,并用人均碳排放量来衡量各地区的碳排放公平情况,随后分别采用 Dagum 基尼分解方法和 Markov 链模型从整体差异程度和内部差异固化的角度比较了中国碳排放公平和碳排放效率的区域差异,得到了一些较为有意义的结论和启示。

(1) 中国碳排放公平和效率空间格局并不一致

通过 ArcGIS 可视化发现,中国碳排放公平的空间格局主要呈现南北差异特征,而碳排放效率的空间分异格局主要表现在东西差异上,且随着时间变化,二者的这种分异格局都呈现加剧和更明显的趋势。另外,随着时间变化,中国各地区碳排放效率的提高不明显,而各类型地区碳排放公平都有所增加。可见,中国碳排放公平和效率呈现出不一致的时空分异特征,且随着时间变化,二者空间非均衡格局的差异愈加明显。

(2) 中国碳排放效率的地区差异程度更加大

通过整体 Dagum 基尼系数分析发现,中国区域碳排放效率的基尼系数比公平更高,且增长趋势更为明显,接近 0.4 的“警戒线”水平,二者差异没有缩小的趋势。从三大地区内部看,效率和公平的差异表现和整体不一致,但从地区之间来看,二者差异情况和全国情形一致,都是碳排放效率的差异更加明显。并且在差异来源上,区域间差异是碳排放效率整体差异的主要原因,而对碳排放公平而言,区域内差异和区域间差异对整体差异的贡献度不稳定,且贡献程度相对较小,差异分解结果再一次验证了中国碳排放效率相比碳排放公平的区域间差异更大这一事实。

(3) 我国碳排放的“长期低效率”固化问题比“长期不公平”问题更严重

采用不同时长的 Markov 转移概率矩阵分析发现,虽然中国碳排放公平和效率不同水平地区之间的流动性都不高,各水平类型地区存在着一定的固化现象,但在不同时长下,碳排放效率的固化程度都更高。即从动态上看,中国各地区间碳排放效率的“追赶”效应更缓慢,呈现出更明显的“高者恒高、低者恒低”固化现象,“长期低效率”问题比“长期不公平”问题更严重。

通过以上研究结论,本文得到如下政策启示:(1) 我国各地区碳排放公平和效率大小具有愈加明显的非一致性,公平原则和效率原则对各地区而言重要性不同,因此,考虑两类原则的重要性差异对各地区极有必要。(2) 中央政府在制定碳减排战略目标时,应该更加重视区域碳排放效率的差异问题,更多的从碳排放效率上入手,挖掘其存在的更大碳减排潜力。(3) 在结合公平原则和效率原则计算各地区碳减排潜力时,应给予碳排放效率指标更大的权重,而不应该认为二者同等重要[24-25],使处于“长期低效率”地区的碳减排潜力及碳减排分摊任务将有所提高。(4) 中央政府应该对那些碳排放“长期低效率”的地区进行更多的扶持,一方面,这种扶持通过提高这些地区的碳排放效率能挖掘其较大的碳减排潜力,以顺利完成我国总的碳减排目标;另一方面,由于这些“长期低效率”地区主要为经济相对落后的中西部地区,这种扶持也可以尽量避免因过重的碳减排任务影

响这些地区的经济发展，以实现区域的协调发展。

参考文献(References)

[1] ZHOU P, WANG M. Carbon dioxide emissions allocation: A review [J]. Ecological Economics, 2016, 125(3): 47－59.

[2] 宋杰鲲，张凯新，曹子建. 省域碳排放配额分配—融合公平和效率的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(5): 7－13. [SONG Jiekun, ZHANG Kaixin, CAO Zijian. Provincial allocation of carbon emission quotas-under the fusion of fairness and efficiency[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(5): 7－13.]

[3] ROSE A. Reducing conflict in global warming policy: The potential of equity as a unifying principle[J]. Energy Policy, 1990, 18(10): 927－935.

[4] RINGIUS L, TORVANGER A, HOLTSMARK B. Can multi-criteria rules fairly distribute climate burdens: OECD results from three burden sharing rules[J]. Energy Policy, 1998, 26(10): 777－793.

[5] VAILLANCOURT K, WAAUB J P. Equity in international greenhouse gases abatement scenarios: A multicriteria approach[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 153(2): 489－505.

[6] ZHOU P, ZHANG L, ZHOU D Q, et al. Modeling economic performance of interprovincial CO_2 emission reduction quota trading in China[J]. Applied Energy, 2013, 112(16): 1518－1528.

[7] ZETTERBERG L, WRAKE M, STERNER T, et al. Short-run allocation of emissions allowances and long-term goals for climate policy[J]. Ambio, 2012, 41(1): 23－32.

[8] ROSE A, ZHANG Z X. Interregional burden-sharing of greenhouse gas mitigation in the United States[J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 2003, 9(4): 477－500.

[9] GROENENBER H, BLOK K. Benchmark-based emission allocation in a cap-and-trade system[J]. Climate Policy, 2002, 2(1): 105－109.

[10] LUZZATI T, GUCCIARDI G. A non-simplistic approach to composite indicators and rankings: An illustration by comparing the sustainability of the EU countries[J]. Ecological Economics, 2015, (113): 25－38.

[11] CLARKE-SATHER A, QU J S, WANG Q, et al. Carbon inequality at the sub-national scale: A case study of provincial-level inequality in CO_2 emissions in China 1997—2007[J]. Energy Policy, 2011, 39(9): 5420－5428.

[12] HAILU A, VEEMAN T S. Non-parametric productivity analysis with undesirable outputs: An application to the Canadian pulp and paper industry[J]. American Journal of Agricultural Economics, 2001, 83(3): 605－616.

[13] ZHOU P, ANG B W. Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance[J]. Energy Policy, 2008, 36(8): 2911－2916.

[14] 王群伟，周鹏，周德群. 中国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素[J]. 中国工业经济, 2010, 1(1): 45－54. [WANG Qunwei, ZHOU Peng, ZHOU Dequn. Research on dynamic carbon dioxide emissions performance, regional disparity and affecting factors in China[J]. China Industrial Economics, 2010, 1(1): 45－54.]

[15] LIU Y, ZHAO G, ZHAO Y. An analysis of Chinese provincial carbon dioxide emission efficiencies based on energy consumption structure[J]. Energy Policy, 2016, 96(9): 524－533.

[16] YAN D, LEI Y, LI L, et al. Carbon emission efficiency and spatial clustering analyses in China's thermal power industry: Evidence from the provincial level[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 156(7): 518－527.

[17] 王惠，王树乔. 中国工业 CO_2 排放绩效的动态演化与空间外溢效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(9): 29－36. [WANG Hui, WANG Shuqiao. A study on dynamic evolution of industrial carbon emissions performance and its factors in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(9): 29－36.]

[18] 李小胜，宋马林. “十二五”时期中国碳排放额度分配评估——基于效率视角的比较分析[J]. 中国工业经济, 2015, (9): 99－113. [LI Xiaosheng, SONG Malin. Regional allocation of CO_2 emissions allowance during the "Twelfth Five-Year Plan" in China: From the perspective of efficiency comparative analysis[J]. China Industrial Economics, 2015, (9): 99－113.]

[19] 曹珂，屈小娥. 中国区域碳排放绩效评估及减碳潜力研究[J]. 中国人口. 资源与环境, 2014, 24(8): 24－32. [CAO Ke, QU Xiao'e. Research on regional carbon emissions performance evaluation and carbon reduction potential in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(8): 24－32.]

[20] ZHOU P, SUN Z R, ZHOU D Q. Optimal path for controlling CO_2 emissions in China: A perspective of efficiency analysis[J]. Energy Economics, 2014, 45(9): 99－110.

[21] 王科，李默洁. 碳排放配额分配的 DEA 建模与应用[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2013, 15(4): 7－13. [WANG Ke, LI Mojie. DEA-based carbon emission allowance allocation modeling and application [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Science Edition), 2013, 15(4): 7－13.]

[22] 傅京燕，黄芬. 中国碳交易市场 CO_2 排放权地区间分配效率研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(2): 1－9. [FU Jingyan, HUANG Fen. Study on the distribution efficiency of CO_2 emissions in China's carbon trading market[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(2): 1－9.]

[23] WEI C, NI J, DU L. Regional allocation of carbon dioxide abatement in China[J]. China Economic Review, 2012, 23(3): 552－565.

[24] 吴贤荣，张俊飚，田云，等. 基于公平与效率双重视角的中国农业碳减排潜力分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1172－1182. [WU Xianrong, ZHANG Junbiao, TIAN Yun, et al. Analysis on China's agricultural carbon abatement capacity from the perspective of both equity and efficiency[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1172－1182.]

[25] 冯冬，李健. 京津冀区域城市二氧化碳排放效率及减排潜力研究[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 978－986. [FENG Dong, LI Jian. Research of the carbon dioxide emission efficiency and reduction potential of cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Resources Science, 2017, 39(5): 978－986.]

[26] 周泽炯，胡建辉. 基于 Super-SBM 模型的低碳经济发展绩效评价研究[J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2457－2466. [ZHOU Zejiong, HU Jianhui. Evaluation of low carbon economy development efficiency based on a super-SBM model[J]. Resources Science, 2013, 35(12): 2457－2466.]

[27] DAGUM C. A new approach to the decomposition of the Gini in-

come inequality ratio[J]. Empirical Economics, 1997, 22(4): 515－531.

[28] 张虎,周迪. 创新价值链视角下的区域创新水平地区差距及趋同演变——基于 Dagum 基尼系数分解及空间 Markov 链的实证研究[J]. 研究与发展管理. 2016,28(6):48－60. [ZHANG Hu, ZHOU Di. China's regional disparities and convergence evolution of regional innovation level from the perspective of innovative value Chain: Empirical study based on Dagum's Gini coefficient decomposition and spatial Markov Chain[J]. R&D Management, 2016,28(6):48－60.

[29] GALLO J L. Space-time analysis of GDP disparities among European Regions: A Markov chain approach[J]. International Regional Science Review, 2001, 27(2):138－163.

[30] 单豪杰. 中国资本存量 k 的再估算——1952—2006 年[J]. 数量经济技术经济研究,2008,25(10):17－31. [SHAN Haojie. Reestimating the capital stock of China: 1952—2006[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2008, 25(10):17－31.]

[31] 杜立民. 中国二氧化碳排放的影响因素:基于省级面板数据的研究[J]. 南方经济, 2010, (11):20－33. [DU Limin. Impact factors of China's carbon dioxide emissions provincial panel data analysis[J]. South China Journal of Economics, 2010, (11):20－33.]

Regional differences and its solidification of carbon emission in China: An equity and efficiency perspective

ZHOU Di[1], ZHOU Feng-nian[2], ZHENG Chu-peng[1]

(1 *School of International Trade & Economics, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou* 510006, *Guangdong, China*; 2 *Changjiang River Estuary Water Environment Monitoring Center, Changjiang River Estuary Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Shanghai* 200136, *China*)

Abstract: From the perspective of equity and efficiency, we investigated the difference of carbon production in different provinces and then compared the importance of equity principle and efficiency principle, which is of great significance for the government to formulate a scientific regional carbon emission reduction policy. With the data about 29 provincial-level regions in China from 1997 to 2015, this study firstly calculated the carbon emission efficiency of each province using Super-SBM model, taking capital stock, labor force and energy consumption as input variables, GDP and CO_2 emissions as expected and non-expected output variables; and calculated the carbon emission equity by the amount carbon emissions per capita. Secondly, based on ArcGIS software, the carbon emission equity and carbon emission efficiency at the beginning and the end of the study period were visualized to study the spatial pattern and differences among them. Finally, the Dagum Gini decomposition method and Markov Chain method were adopted to compares the regional differences of carbon emission equity and efficiency from two aspects: the degree of overall differences and the solidification of internal differences. The results show as follows: (1) There is more and more obvious inconsistency between carbon emission equity and efficiency in different regions of China, and the importance of equity principle and efficiency principle is different for different regions. Therefore, it is necessary to consider the important differences of the two principles for different regions. (2) The degree of difference in China's carbon emission efficiency, whether as a whole or between the three Regions is greater than that of equity, and the difference between them is not going to be narrowed. In terms of contribution sources, regional differences are the main reason for overall differences in carbon emission efficiency, while the overall differences in carbon emission equity takes a small influence relatively. (3) The degree of solidification of regional differences in carbon emission efficiency is also higher than that of carbon emission equity; China's regional "long-term low efficiency" solidification problem of carbon emissions is more serious than that of regional "long-term low equity". Therefore, this paper argues that the principle of efficiency is more important than the principle of equity in calculating China's regional carbon emission reduction potential and carbon emission reduction quota allocation. The central government should also pay more attention to the difference of regional carbon emission efficiency, start from the efficiency of carbon emissions, tap the potential of carbon emission reduction, and give more support to those areas with "long-term low efficiency" of carbon emissions.

Key words: carbon emission fairness; carbon emission efficiency; regional difference; Super-SBM model; Dagum Gini coefficient; Markov chain model